

海洋胶体对光合细菌生长的效应*

郑爱榕 陈 敏 郑雪红 张 磊 沈海维

厦门大学海洋学系, 亚热带海洋研究所, 厦门 361005

摘要 利用错流超滤技术提取海洋胶体(分子量 $>10\text{ ku}$), 研究了4种培养介质中海洋胶体对光合细菌(PSB)生长的影响. 结果显示, 在添加胶体的天然超滤海水(分子量 $<10\text{ ku}$ 的天然海水溶液)中, PSB的生长呈对数衰减, 胶体对其生长无影响; 在只含氮、磷等无机营养盐的介质中, 胶体有机碳(COC)的C浓度为 $255.0\text{ }\mu\text{mol/L}$ 时PSB的相对生长率比在无胶体时提高5.4%; 在含氮、磷等营养盐和醋酸钠的介质中, COC的C为 $5.1\sim 255.0\text{ }\mu\text{mol/L}$ 时比在无胶体时平均提高22.3%; 在含氮、磷等营养盐、醋酸钠和酵母膏的介质中, COC的C为 5.1 和 $127.5\text{ }\mu\text{mol/L}$ 时比在无胶体时平均分别提高了15.7%和11.3%. 表明海洋胶体对PSB的生长效应与培养介质的营养成分和胶体浓度相关, 在适宜PSB生长的条件下, 海洋胶体对PSB的生长有显著的促进作用, 但这种作用与胶体浓度之间没有明显的线性关系.

关键词 海洋胶体 光合细菌 生长 效应

胶体在海水中普遍存在, 海水中胶体大多由有机大分子组成^[1-5]. 海洋胶体的生物地球化学循环研究^[6]表明, 海洋胶体主要来源于浮游植物和细菌释放的多糖, 此外浮游植物和细菌细胞的溶解及摄食活动、颗粒有机物的降解、陆源物质的输入等也会产生胶体物质. 由此, 不难看出海洋胶体与海洋生物活动息息相关. 目前, 对海洋胶体的生物地球化学行为虽有一定程度的了解, 但其生物可利用性知之甚少. Amon等^[7]在1994年对比了胶体物质和低分子量有机物的生物可利用性的强弱, 结果发现细菌的生长和代谢速率在胶体存在下提高了3~6倍, 1996年他们又提出了与传统观点大相径庭的理论, 即胶体的生物活性随着颗粒粒径的增大而增大^[8]. 已有的文献报道, 海洋、湖泊溶解有机物是细菌和浮游植物可利用氮的一个重要来源, 它们含量的增加可促进藻类的繁殖和生长, 甚至引起赤潮的发生^[9-13]; 但也有部分研究表明海洋溶解有机物的存在会降低海域初级生产力和生物量水平^[14]. 因此, 有理由推测: 海洋胶体可通过细菌的分解作用对初级生产、次级生产力等生物学过程产生重要影

响. 光合细菌(PSB)是具有光合色素、能在厌氧光照条件下进行光合作用的原核生物的总称, 广泛分布于海洋、湖沼、江河、池塘、污泥和土壤, 在自然界的碳、氢和硫循环中起着重要作用^[15]. 本文以PSB为对象, 利用错流超滤技术提取海洋胶体, 研究海洋胶体对细菌的生长效应, 探讨海洋胶体的生物可利用性, 为赤潮形成机制的探索、预测与治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 光合细菌

PSB系沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris*), 由海泥分离得到, 培养配方见文献^[16], 培养液于 115°C 高温灭菌 $15\sim 20\text{ min}$, 在 $\text{pH } 7.0$, 28°C 下厌氧光照(用 40 W 白炽灯对称照明).

1.2 胶体提取

提取胶体的海水于2000年12月1日取自厦门前埔会展中心附近海域. 采集表层海水约 240 L , 盐

2001-10-09 收稿, 2001-12-03 收修稿

* 国家教育部高等学校骨干教师计划基金资助项目

E-mail: arzheng@jingxian.xmu.edu.cn

度为 3.05%。样品运回实验室后,用孔径为 0.22 μm 的 Cartridge 膜过滤,除去其中的悬浮颗粒物。取过滤液 210 L,利用标称截留分子量为 10 ku 的中空纤维超滤膜(Amicon 公司生产,型号为 H10P10-20)浓缩海水中的天然胶体。超滤结束时,截留液体积为 4.14 L,浓集系数 $f_c = 50.7$,超滤过程中有机碳的回收率 $R = 84\%$ 。与此同时,分别取截留液和超滤液各 10 mL 平行 2 份,并滴入 2 滴浓磷酸酸化,置于 4℃ 保存,供有机碳分析。供有机碳分析的样品经高温催化氧化后用总有机碳分析仪(Shimadzu-5000A)测定,与标准样品的误差 $< 10\%$ 。结果表明:超滤液中($m_r < 10$ ku 组分)的有机碳含量 $C_{C1} = (47 \pm 2)$ $\mu\text{mol/L}$;截留液中($m_r > 10$ ku 组分)有机碳含量 $C_{C2} = (305 \pm 6)$ $\mu\text{mol/L}$;该海水中 $m_r > 10$ ku 胶体的天然含量为: $C_C = \frac{C_{C2} - C_{C1}}{f_c} = \frac{305 - 47}{50.7} = 5.1$ $\mu\text{mol/L}$ 。具体流程和分析方法详见文献 [17]。

1.3 实验方法

首先,分别配制体积百分比分别为 0%, 2%, 50% 和 100% 的截留液与超滤液(a, b, c 和 d 4 种溶液),使其分子量 > 10 ku 的胶体的碳浓度分别为 0, 5.1, 127.5 和 255.0 $\mu\text{mol/L}$,分子量 < 10 ku 的胶体的碳浓度均为 47 $\mu\text{mol/L}$ 。然后,对每一种溶液按营养成分不同又分别配制不添加营养和添加营养 I、营养 II 及营养 III 4 种培养体系。其中营养 I 体系添加 NH_4Cl (1.0 g/L), K_2HPO_4 (0.4 g/L), KH_2PO_4 (0.6 g/L), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.4 g/L) 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.4 g/L); 营养 II 体系添加营养 I 和醋酸钠(3.5 g/L); 营养 III 体系添加营养 II 和酵母膏(0.1 g/L)。将培养至指数生长期的 PSB 离心,用蒸馏水洗涤 2 次后分别等份加入配制好的上述 16 种营养液(初始的细菌密度均约为 $1.46 \times 10^9/\text{mL}$),在 28℃ 下置于细菌培养箱中厌氧光照培养,每天摇晃 1 次,并定时用 721 分光光度计在 660nm 波长下测定各培养液的吸光值(A),细菌数(N)按线性方程 $N = (7.62A + 0.146) \times 10^9$ 换算。实验所用超滤海水、试剂和玻璃器皿均经高温灭菌。实验所用试剂为分析纯。

2 结果和讨论

图 1 是 PSB 在 16 种培养介质中的相对生长曲线。由图 1(a)可知:在未添加任何营养物质的天然超滤海水(分子量 < 10 ku 的天然海水溶液)中,光

合细菌不论在何种浓度的胶体介质中,其相对生长率 N_t/N_0 (N_0 为初始时的细菌数; N_t 为 t 时的细菌数)随培养时间 t 均呈指数衰减,线性拟合表明其相关性十分显著(见表 1)。说明在天然超滤海水介质中,缺少 PSB 生存所必需的氮、磷等营养,故海洋胶体对其毫无作用。

图 1(b)是 PSB 在营养 I 体系及不同浓度的胶体中的生长情况。显然,在含有 PSB 所必需的氮、磷等无机营养盐中,其生长与在天然超滤海水有所不同。前 4 d,呈指数生长,其后 9 d 呈指数下降,其相关性较显著(表 1)。不同浓度的胶体对其影响的趋势一样,但程度不同。COC 为 255.0 $\mu\text{mol/L}$ 时,PSB 的相对生长率比无胶体存在时提高了 1.8%~10.5%,平均 5.4%;COC 为 127.5 $\mu\text{mol/L}$ 时却下降了 2.5%~21.6%,平均 8.4%;而在 COC 为 5.1 $\mu\text{mol/L}$ 时则前 4d 平均提高了 2.2%,后 9d 却平均下降了 2.7%(图 2)。说明在氮、磷等必需的无机营养盐存在下,适当浓度的胶体对 PSB 的生长有一定的促进作用。

表 1 光合细菌相对生长率(N_t/N_0)与培养时间 t 的相关关系

培养体系	COC $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$N_t/N_0 = a + b \ln t$		相关系数	n	置信度 /%
		a	b			
超滤海水	0.0	0.999	-0.107	0.9986	8	99
	5.1	1.011	-0.102	0.9894	8	99
	127.5	0.985	-0.095	0.9839	8	99
	255.0	1.017	-0.111	0.9794	8	99
营养 I	0.0	1.010	0.175	0.9903	4	99
	5.1	0.995	0.094	0.9922	4	99
	127.5	0.999	0.133	0.9767	4	95
	255.0	0.988	0.126	0.9474	4	90
	0.0	1.359	-0.131	0.9810	4	95
	5.1	1.332	-0.132	0.9781	4	95
	127.5	1.561	-0.297	0.9960	4	90
	255.0	1.276	-0.071	0.8999	4	90
营养 II	0.0	0.985	0.179	0.9814	8	99
	5.1	1.036	0.317	0.9914	8	99
	127.5	1.024	0.328	0.9908	8	99
	255.0	1.061	0.299	0.9710	8	99
营养 III	0.0	1.059	0.247	0.9695	8	99
	5.1	1.041	0.398	0.9729	8	99
	127.5	1.042	0.356	0.9879	8	99
	255.0	0.988	0.329	0.9710	8	99

图 1(c)是 PSB 在营养 II 体系的生长情况。显然 PSB 呈指数快速生长, N_t/N_0 与 $\ln(t)$ 的相关性十分显著(表 1)。当 COC 为 5.1~225.0 $\mu\text{mol/L}$ 时,PSB 的 N_t/N_0 比在无胶体存在时提高了 17.4%~26.4%,平均 22.3%(图 2),说明在既有氮、磷营

养盐又有醋酸钠的介质中, 海洋胶体对 PSB 的生长有显著的促进效应. 因 PSB 在厌氧光照条件下, 能以低级脂肪酸、多种二羧酸、醇类、糖类、芳香族

化合物等低分子有机物为光合作用的电子供体, 进行光能异养生长^[18].

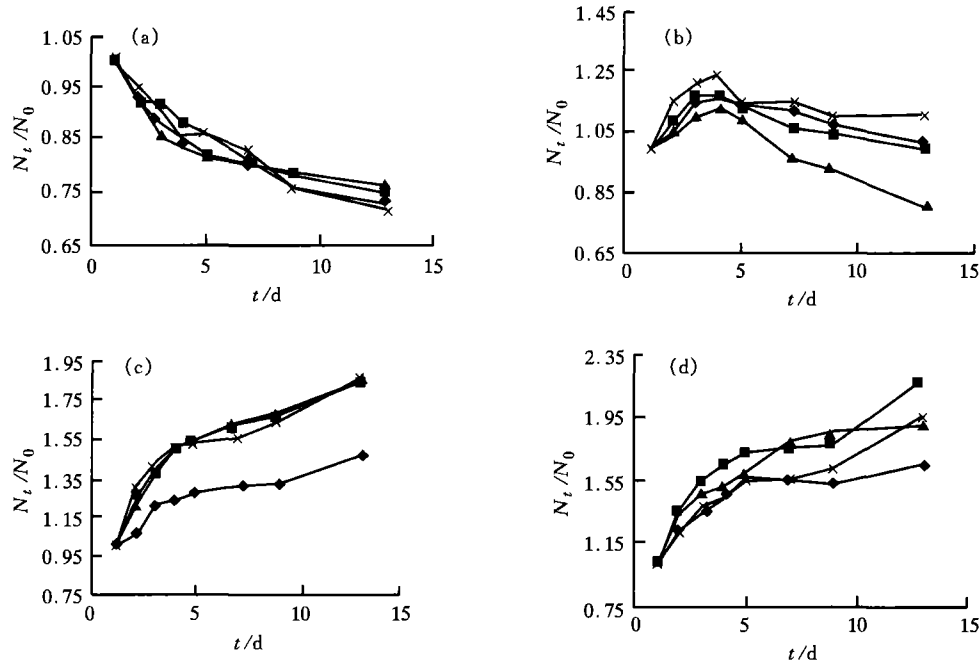


图1 光合细菌在各种营养介质的相对生长曲线

◆, ■, ▲和×表示 COC 分别为 0, 5.1, 127.5 和 255.0 μmol/L. (a) 超滤海水体系; (b) 营养 I 体系; (c) 营养 II 体系; (d) 营养 III 体系

同样, 由图 1(d)也可看出: 在营养 III 体系即含有氮磷营养盐、醋酸钠和酵母膏(其主要成分为蛋白质、氨基酸和维生素等)的介质中, PSB 的生长与图 1(c)类似, $N_t/N_0 \sim \ln(t)$ 依然线性相关(表 1). 当 COC 为 5.1 μmol/L(现场海区海水中的胶体浓度)时, PSB 的 N_t/N_0 比无胶体存在时提高了 9.0%~30.9%, 平均 15.7%; COC 为 127.5 μmol/L 时, 提高了 3.2%~21.7%, 平均 11.3%; COC 为 255.0 μmol/L 时, 前 9 d 没有增长, 后 4 d 才平均增长 9.7%, 似乎胶体浓度增加, PSB 的平均增长率有所下降(图 2). 比较图 1(c)和(d)可发现, 无胶体存在时添加酵母膏可使 PSB 的相对生长率比未添加酵母膏平均提高 15.5%, 而在胶体存在时当 COC 为 5.1 μmol/L, 只使 PSB 的 N_t/N_0 平均提高 8.6%, 当 COC 为其他浓度, PSB 的 N_t/N_0 几乎没有提高, 这似乎意味着胶体对 PSB 生长的影响与介质有机营养成分的分子量大小有关, 即有机营养成分的分子量较大时, 低浓度的胶体较高浓度的有利于 PSB 的生长.

Amon 等^[8]认为异养细菌对溶解有机物(DOM)的利用程度取决于 DOM 的生化组成和分子大小、无机营养盐的浓度以及其他环境因素, 如温度等.

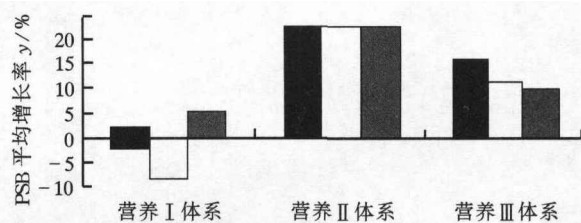


图2 PSB 在 3 种培养体系、不同浓度的胶体介质中相对生长率的平均增长率 y

■ $C_c = 5.1 \mu\text{mol/L}$; □ $C_c = 127.5 \mu\text{mol/L}$; ▒ $C_c = 255.0 \mu\text{mol/L}$;

$y = \frac{(N_t/N_0)_c - (N_t/N_0)_0}{(N_t/N_0)_0} \times 100\%$, 其中 $(N_t/N_0)_0$ 为 PSB 在无胶体介质中的相对生长率; $(N_t/N_0)_c$ 为 PSB 在一定浓度的胶体介质中之相对生长率

综上所述, 海洋胶体对 PSB 的生长效应与培养基质的营养成分、有机营养成分的分子量大小及胶体浓度密切相关. 在适宜 PSB 生长的条件下, 海洋胶体(分子量 > 10 ku)对 PSB 的生长有显著的促进效应, 相对生长率可平均提高 11%~22%, 这与 Amon 等^[7]的结果——细菌的生长与代谢速率在胶体存在下提高了 3~6 倍相比趋势一致. 上述研究还表明胶体对细菌的影响程度与胶体浓度之间没有明显的线性关系, 这可能与介质的有机物浓度及组成有关, 需做进一步的研究.

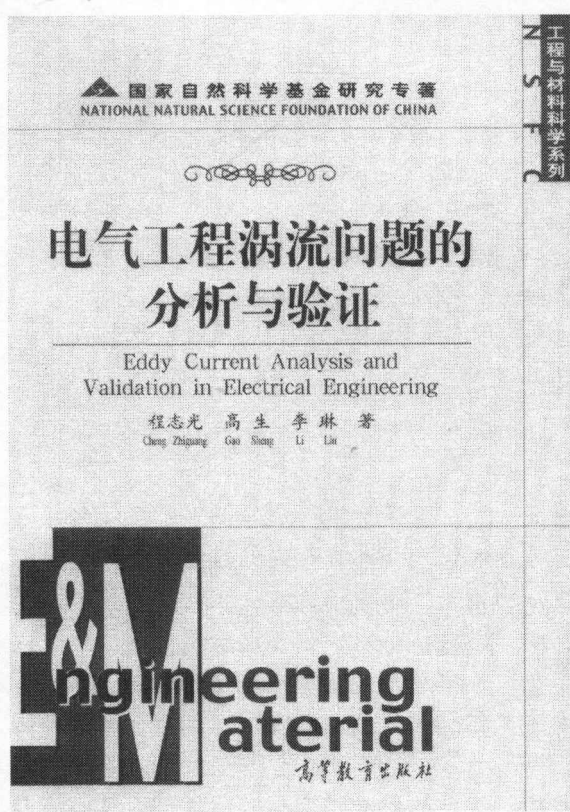
致谢 感谢福建省水产研究所李秀珠同志为本研究提供光合细菌菌种。

参 考 文 献

- Benner R, et al. Bulk chemical characteristics of dissolved organic matter in the ocean. *Science*, 1992, 255(5051): 1561
- Guo L, et al. Composition and cycling of colloids in marine environment. *Rev of Geophys*, 1997, 35 (1): 1
- 王江涛. 黄河、长江和钱塘江水体中的胶体有机碳. *科学通报*, 1998, 43(8): 840
- Hunt A P, et al. Further evidence of elemental composition as an indicator of the bioavailability of humic substances to bacteria. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45(1): 237
- Berman T, et al. The role of DON and the effect of N: P ratios on occurrence of cyanobacterial blooms: Implication from the outgrowth of *Aphanizomenon* in Lake Kinneret. *Limnol Oceanogr*, 2001, 46(2): 443
- Wells M L, et al. The distribution of colloids in the North Atlantic and Southern Oceans. *Limnol Oceanogr*, 1994, 39(2): 286
- Amon R M W, et al. Rapid cycling of high-molecular-weight dissolved organic matter in the ocean. *Nature*, 1994, 369(6481): 549
- Amon R M W, et al. Bacterial utilization of different size classes of dissolved organic matter. *Limnol Oceanogr*, 1996, 41(1): 41
- Carlsson P, et al. Nitrogen bound to humic matter of terrestrial origin? a nitrogen pool for coastal phytoplankton? *Mar Ecol Prog Ser*, 1993, 97(1): 105
- Lovley D R, et al. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. *Nature*, 1996, 382(6590): 445
- Berman T, et al. Algal growth on organic compounds as nitrogen sources. *J Plankton Res*, 1999, 21(8): 1423
- Maestrini S Y, et al. Nitrogenous organic substances as potential nitrogen sources, for summer phytoplankton in the Gulf of Riga, eastern Baltic Sea. *Plankton Biol Ecol*, 1999, 46(1): 8
- 程 凯, 等. 武汉市解放公园池塘的微囊藻水华及其毒性变化的生态研究. *自然科学进展*, 2001, 11 (9): 921
- Jackson T A, et al. Depression of primary productivity by humic matter in lake and reservoir waters of the boreal forest zone. *Can J Fish Aquat Sci*, 1980, 37(12): 2300
- 朱章玉, 等. 光合细菌的研究及其应用. 上海: 上海出版社, 1991
- 李秀珠, 等. 海洋光合细菌的分离培养研究. *福建水产*, 1993, (2): 1
- 陈 敏, 等. 错流超滤技术在海水胶体态铀、钍、镭同位素和有机碳研究中的应用. *海洋学报*, 2000, 22 (5): 51
- 史家梁, 等. 利用光合细菌处理豆制品废水的研究. *上海环境科学*, 1987, 6(10): 22

国家自然科学基金研究成果专著

《电气工程涡流问题的分析与验证》程志光, 等 编著
高等教育出版社 定价: 31.00 元



本书系统地研究了电气工程三维涡流问题的有限元分析方法、各类分析方法的验证和工程应用。全书由两篇构成。方法篇中系统介绍了解决大型工程涡流问题的基础知识, 深入研究了三维涡流问题的基本解法, 分析各种方法的特点, 展现基于各种动态位组及其组合的数值实现过程。验证与应用篇在涡流分析方法的验证及工程应用中以大型电力变压器为工程背景, 提出并建立了具有工程背景的第21国际基准问题及其进一步扩展的杂散损耗基准族; 严格地验证了各种分析方法的有效性, 深入研究了钢中的杂散损耗, 扼要介绍了模拟试验技术。强调在电工产品研发、设计过程中建立完备的电磁设计环境的必要性, 介绍了涡流分析的典型的工业应用。

面向工程进行方法研究和验证, 参与国际 TEAM (Testing Electromagnetic Analysis Methods) 研究活动, 是本书的主要特点。